罗布泊盐湖沉积物磁性特征及其环境意义

李 文[1,2]， 穆桂金[2]， 林永崇[3]， 张慧娟[1]， 吴汪洋[1]
（1. 东华理工大学地球科学学院，江西 南昌 330013；2. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011；3. 闽南师范大学历史地理学院，福建 漳州 363000）

摘 要：以罗布泊盐湖沉积物为研究对象，以环境磁学为主要研究方法，探讨罗布泊盐湖沉积物磁性特征的影响因素和环境意义。根据磁性特征可将罗布泊LOP1剖面沉积物分为两类：磁铁矿主导和铁硫化物（胶黄铁矿和黄铁矿）主导。磁铁矿主要来源于物源区塔里木盆地。胶黄铁矿和黄铁矿是早期还原成岩作用的产物，对磁性特征产生显著影响，胶黄铁矿主导层具有明显较高的χ、SIRM、χ_{ARM}、χ_{ARM}/χ和$S_{-300\ mT}$，黄铁矿相反。有机质供应增加是罗布泊盐湖沉积早期成岩作用的触发因素，中晚全新世以来冷事件期间塔里木盆地湿度改善，有机质供应增加，促使了早期成岩成因的自生铁硫化物生成。

关键词：磁性特征；早期成岩；盐湖；气候变化；罗布泊

干旱区盐湖沉积是区域气候环境演变的信息存储载体[1-3]。成盐作用是盐湖区别于淡水湖的独特地质作用，一方面密切关联于区域气候水文变化，同时又深刻影响了盐湖的地球化学、矿物学、生物学特征[1,4-5]。沉积物磁性特征在沉积环境演化研究中被广泛应用[6-7]，但盐湖环境中沉积物磁性特征的影响因素和环境意义研究较少。

罗布泊是世界著名的高盐度盐湖，其沉积序列经历了包括盐度变化的多次沉积环境转换，是研究不同条件下沉积物磁性特征和磁性矿物生成转化的理想区域[8]。前人已在罗布泊地区进行了部分环境磁学研究，结果显示罗布泊盐湖沉积物磁性特征变化与成盐作用和粒度有关[9-10]。但尚有大量磁学信息（磁性矿物类型和颗粒，磁性矿物生成转化机制等）有待提取，磁性特征变化的控制因素和环境意义等需要进一步研究。本文拟对罗布泊盐湖及其周边不同类型沉积物进行系统的环境磁学测量，结合粒度、有机质、X射线衍射分析，查明罗布泊盐湖沉积物的磁学特征和影响因素，揭示磁性变化与气候环境变化的关系。

1 研究区概况与研究方法

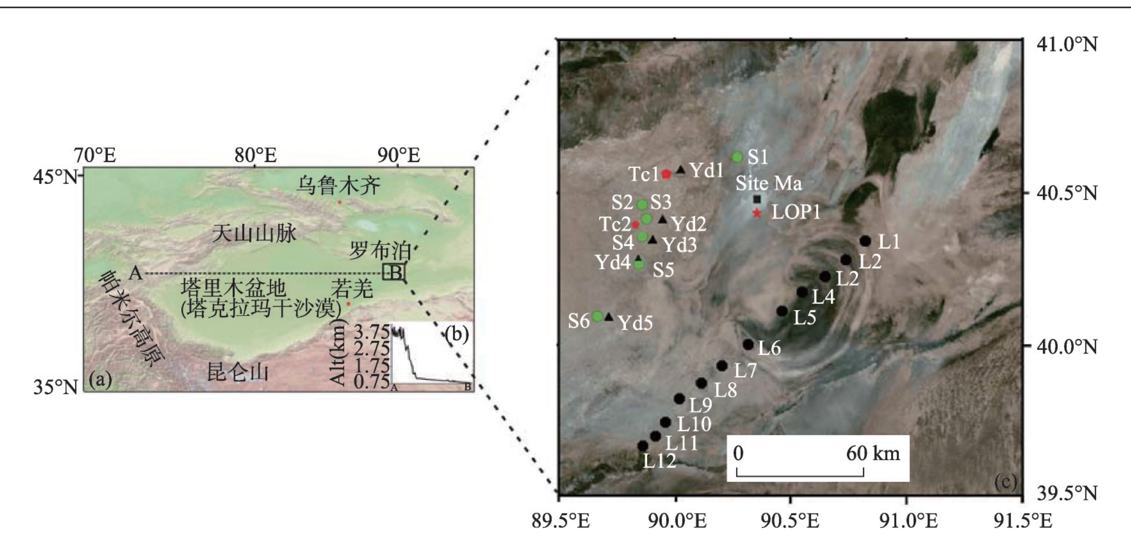
1.1 研究区概况

罗布泊（39.5°~41.5°N，88°~92°E）位于塔里木盆地东部，南依阿尔金山，北靠天山南支库鲁克塔格山，深处亚欧大陆腹地，气候异常干燥，年降水量 < 20 mm，潜在蒸发量 > 3000 mm，全年盛行风方向为NE，年平均风速 > 5 m·s^{-1}[2,11]。历史上罗布泊是中国西部地区最大的湖泊，但目前完全干涸。近期研究发现，罗布泊干涸时间大约在20世纪50—60年代左右，塔里木河流域人类用水强度增加是罗布泊干涸的主要原因[12]。

1.2 研究方法

1.2.1 野外考察与样品采集 2008年，在罗布泊湖心挖掘1处深度为163 cm的浅坑（记为LOP1，坐标为40°26′09″′N，90°21′23″E）（图1），按1 cm间隔取样，共获得163个样品。2016年在罗布泊西岸选取6处风成沙丘（S1~S6），采集6个表层（0~5 cm）风成沙样品；选取5处雅丹地层（Yd1~Yd5），该地区雅丹地层一般表现为黏土质粉砂层（CS层）和砂质粉砂层（SS层）交替组成，笔者分别在CS层和SS层采集

收稿日期：2020-03-23； **修订日期：**2020-05-15
基金项目：国家自然科学基金青年基金项目（41701012）；东华理工大学博士启动基金（DHBK2019028）资助
作者简介：李文（1990-），男，讲师，博士，研究方向为环境磁学与环境演变. E-mail: 623716011@qq.com



注:图b显示罗布泊位于塔里木盆地最低点。

图1　罗布泊位置及样点分布示意图

Fig. 1　Location of Lop Nur and sample site

样品1个,共获得10个雅丹沉积物;选取两处红柳沙包(Tc1~Tc2),分别在不同深度层采集4个和3个红柳沙包样品;并在罗布泊大耳朵区域采集12个表层(0~5 cm)沉积物(L1~L12)。

1.2.2 *实验方法*　粒度:取适量样品,经HCl和H_2O_2去除碳酸盐和有机质后,用马尔文2000激光粒度仪测量。

磁性测量:样品在40 ℃低温环境下烘干后,取5 g左右样品装入样品盒内,依次测量:(1)磁化率(低频磁化率χ_{lf},0.47 kHz和高频磁化率χ_{hf},4.7 kHz);(2)非磁滞剩磁(χ_{ARM},交变磁场峰值为100 mT,直流磁场为0.04 mT);(3)饱和等温剩磁(SIRM,磁场强度为1 T);(4)具有饱和等温剩磁的样品在磁场强度分别为-100 mT,-300 mT环境中退磁后的等温剩磁($IRM_{-100\,mT}$和$IRM_{-300\,mT}$)。磁化率用英国Bartington MS2磁化率仪测量,剩磁用Dtech2000交变退磁仪,MMPM10脉冲磁化仪和JR6旋转磁力仪获取和测量。选取典型样品,利用可变场平移磁天平(MMVFTB)进行磁滞回线和热磁分析。

烧失量(LOI):万分位电子天平称取2~2.5 g样品置于石英坩埚中,105 ℃下烘干8 h并称重(M105),将烘干样品置于马弗炉中,550 ℃灼烧4 h后称重(M550)。有机质烧失量的计算方法为:$LOI550/\%=(M_{105}-M_{550})/(M_{105}-M)\times100\%$。

X射线衍射(XRD)分析:用德国Bruker AXS公司生产的D8-ADVANCE型X射线衍射仪,进行XRD测试分析。测试条件如下:Cu Ka辐射,工作电压40 kV,工作电流49 mA,步长$0.06°\cdot s^{-1}$,扫描速度$0.025°\cdot s^{-1}$,发射夹缝1°,接收夹缝1°,扫描范围5°~80°(2θ)。

2　结果分析

2.1　罗布泊盐湖表层及周边沉积物粒度与磁性特征

如图2a所示,罗布泊地区不同类型沉积物的粒度特征差异显著。盐湖表层沉积物的黏土(<4 μm)、粉砂(4~63 μm)、砂(>63 μm)的平均含量为12.75%,59.81%和27.44%。红柳沙包和风成沙的粒度组成均以砂质组分主导,平均含量分别达到74.44%和90.32%。雅丹黏土质粉砂(CS)层和砂质粉砂(SS)层粒度组成差异明显,前者以粉砂为主,平均含量达到78.21%,后者粉砂和砂含量分别为41.26%和54.75%。

磁性参数χ和SIRM一般指示沉积物中磁性矿物的含量,与χ不同,SIRM不受顺磁性和抗磁性矿物的影响[6-7]。而参数χ_{ARM}与磁性矿物颗粒特征密切相关,单畴(SD)颗粒亚铁磁性矿物的χ_{ARM}显著高于多畴(MD)或超顺磁(SP)颗粒[6-7]。比值参数χ_{ARM}/χ可用来指示磁性颗粒,通常较高的比值反映了较细的SD颗粒。χ和χ_{ARM}的(King图)[13]组合表明各沉积物磁性矿物的颗粒特征接近,多数落在多畴(MD)区域(图2b)。除个别表层沉积物外,多数样品的χ介

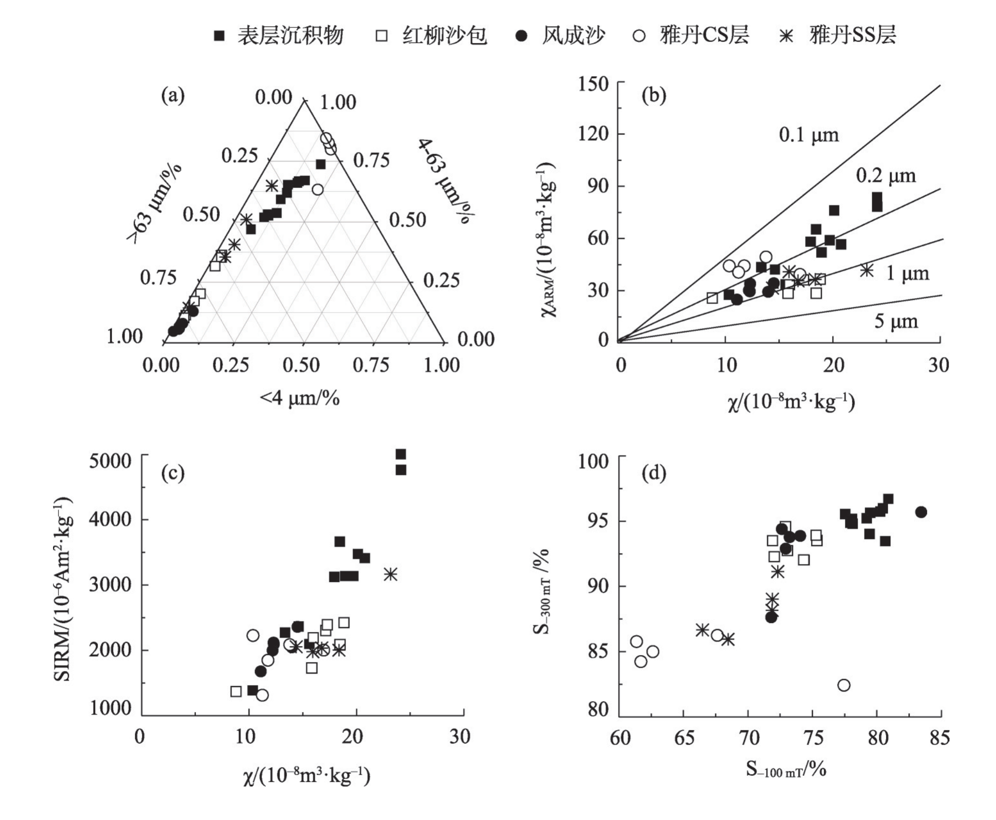


图2　罗布泊盐湖表层、红柳沙包、风成沙、雅丹沉积物粒度特征(a)和磁性特征(b~d)

Fig. 2　Particle size composition and magnetic properties of surface sediments, Tamarix Cone, aeolian sands and yardangs sediments of Lop Nur area

于 10×10^{-8}~20×10^{-8} $m^3\cdot kg^{-1}$，SIRM 介于 1500×10^{-6}~2500×10^{-6} $Am^2\cdot kg^{-1}$(图2c)。退磁参数 $S_{-100\,mT}$ 和 $S_{-300\,mT}$ 反映沉积物中亚铁磁性矿物与不完整反铁磁性矿物的相对组成，随着不完整反铁磁性矿物含量的增加而下降[6-7]。罗布泊地区各类沉积物的 $S_{-300\,mT}$ 均超过80%(图2d)，指示各沉积物磁性特征为亚铁磁性矿物为主[6-7]，但仍存在不完整反铁磁性矿物的贡献，尤其是雅丹沉积物。

2.2　LOP1剖面沉积物粒度特征

如图3所示，LOP1剖面沉积物物质组成以粉砂为主，除17~0 cm和63~52 cm段外，粉砂含量均超过60%。自底部向上至64 cm处，粉砂含量无明显变化。63~52 cm段，粉砂含量保持稳定低值，然后快速升高，至32 cm处达到剖面最高值(88.39%)，后向上至表层快速降低。黏土含量自剖面底部向上呈现波动性增加趋势，在57 cm附近达到最大值(46.49%)，后向上至表层快速下降。砂质组分含量除163~150 cm(10%左右)，146~136 cm(22.5%~46.3%)和22~0 cm(12.2%~61.5%)外，均低于5%。平均粒径自底部向上至65 cm处，呈平稳变细趋势，

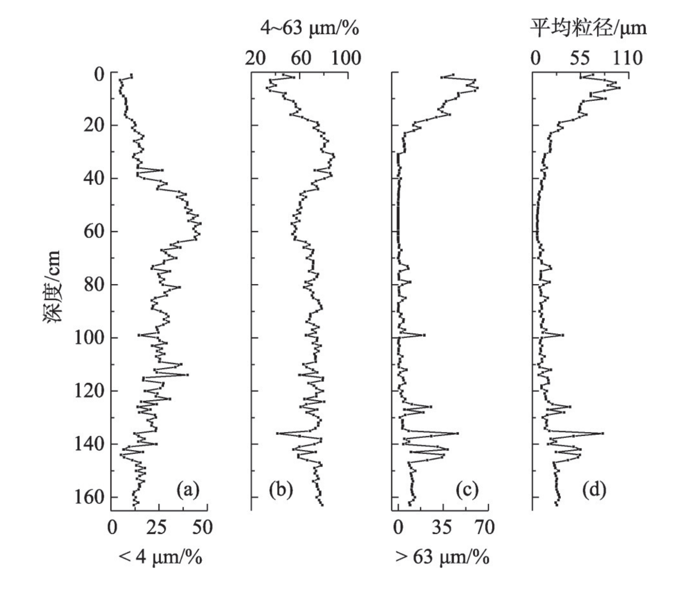


图3　LOP1剖面粒度组成的垂向变化

Fig. 3　Particle size composition of LOP1 profile

但在146~136 cm层颗粒较粗且波动剧烈，64~46 cm深度层保持稳定低值，然后自45 cm向上至表层快速变粗。

2.3　LOP1剖面年代框架

LOP1的年代框架采用与前人研究结果对比的

方法建立，北距LOP1剖面不足10 km的Site Ma剖面（图1）的沉积层序和粒度变化与LOP1剖面完全一致（图4）[14]，Ma等[14]结合传统^{14}C，AMS^{14}C和沉积速率推算的方法建立了该剖面的年代框架，其中75 cm和80 cm两个^{14}C数据的测年材料为植物碎屑，可认为不受碳库效应影响，为实际沉积年龄。通过地层对比，获得LOP1剖面的几个年代控制点，分别为163 cm（3400 Cal. a BP），123 cm（2200 Cal. a BP），80 cm（1100 Cal. a BP），75 cm（800 Cal. a BP），40 cm（400 Cal. a BP），即LOP1剖面的底界年龄约为3400 Cal. a BP，平均速率为0.48 mm·a^{-1}。

2.4 罗布泊LOP1剖面沉积物磁性和有机质特征

如图5a~5f所示，根据磁性特征测量结果，可以将LOP1剖面分为6层：第①层：163~150 cm，第②层：149~123 cm，第③层：122~85 cm，第④层：85~73 cm，第⑤层：72~63 cm，第⑥层：62~0 cm。各层磁性特征如下：

层①，$S_{-300\ mT}$平均值达到98.75%，指示磁性特征为亚铁磁性矿物主导。χ，SIRM，χ_{ARM}和χ_{ARM}/χ四个参数明显高于其他层位，显示该层沉积物中磁性矿物含量较高，颗粒较细。此外，该层较高的SIRM/χ值（平均值33.42 kA·m^{-1}）指示其中含有胶黄铁矿（Fe_3S_4）[15-16]。如图6所示的热磁曲线（M−T），加热曲线上，该层样品（160 cm）磁化强度随着温度升高逐渐增加，至300 ℃处达到最大值，然后随着温度升高快速下降，在500 ℃附近有所增加，出现第2个峰值，这与胶黄铁矿或含胶黄铁矿沉积物的热磁曲线的变化特征一致[15-16]。磁滞回线（图7，160 cm）显示该层样品中磁性矿物的矫顽力较高（Bc=26.21 mT），表明磁性颗粒较细，符合自生胶黄铁矿的特点[15-16]。XRD分析结果也表明该层沉积物的主要磁性矿物为胶黄铁矿（图8）。

层②，$S_{-300\ mT}$略低于层①，显示不完整反铁磁性矿物含量或比例有所增加。自该层底部向上，磁性参数χ、SIRM、χ_{ARM}、χ_{ARM}/χ、SIRM/χ均呈现波动性下降趋势，表明磁性矿物含量下降，颗粒变粗。该层典型样品加热曲线显示了580 ℃的居里温度，表明磁性矿物由磁铁矿主导，600 ℃后磁化强度继续保持一定的下降趋势，指示了赤铁矿的存在[6]（图6，135 cm）。XRD分析结果也表明，该层沉积物的主要磁性矿物为磁铁矿和赤铁矿（图8）。

层③，该层沉积物磁性很弱，各磁性参数均处

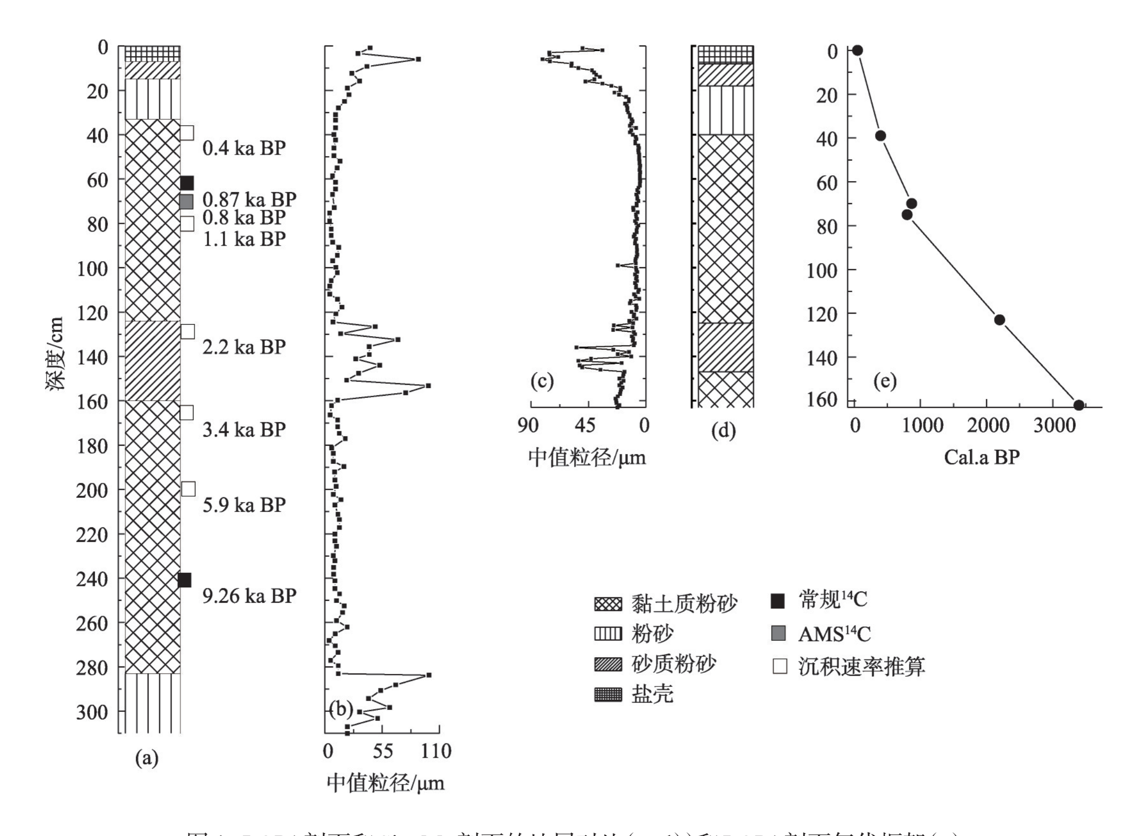


图4 LOP1剖面和Site Ma剖面的地层对比（a~d））和LOP1剖面年代框架（e）

Fig. 4 Stratigraphic correlation between Site Ma profile (a, b)and LOP1 profile (c, d), and age-depth relationship for the LOP1 profile(e)

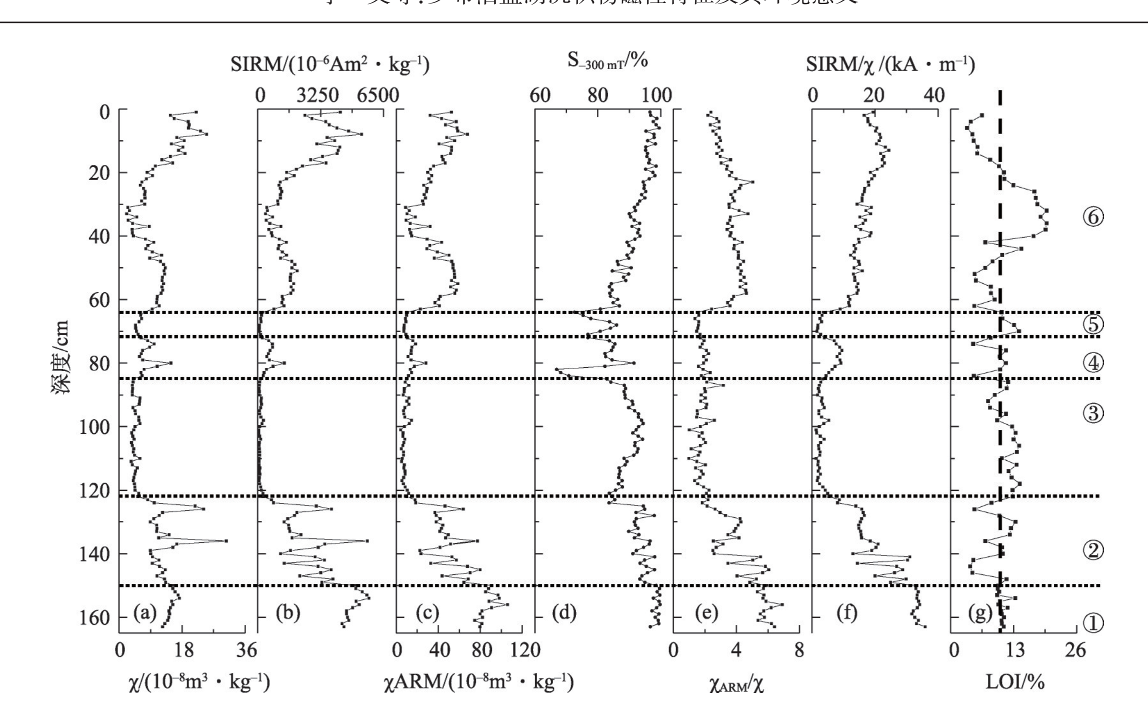


图5　LOP1剖面磁性特征和有机质含量垂向变化

Fig. 5　Magnetic properties and organic matters of LOP1 profile

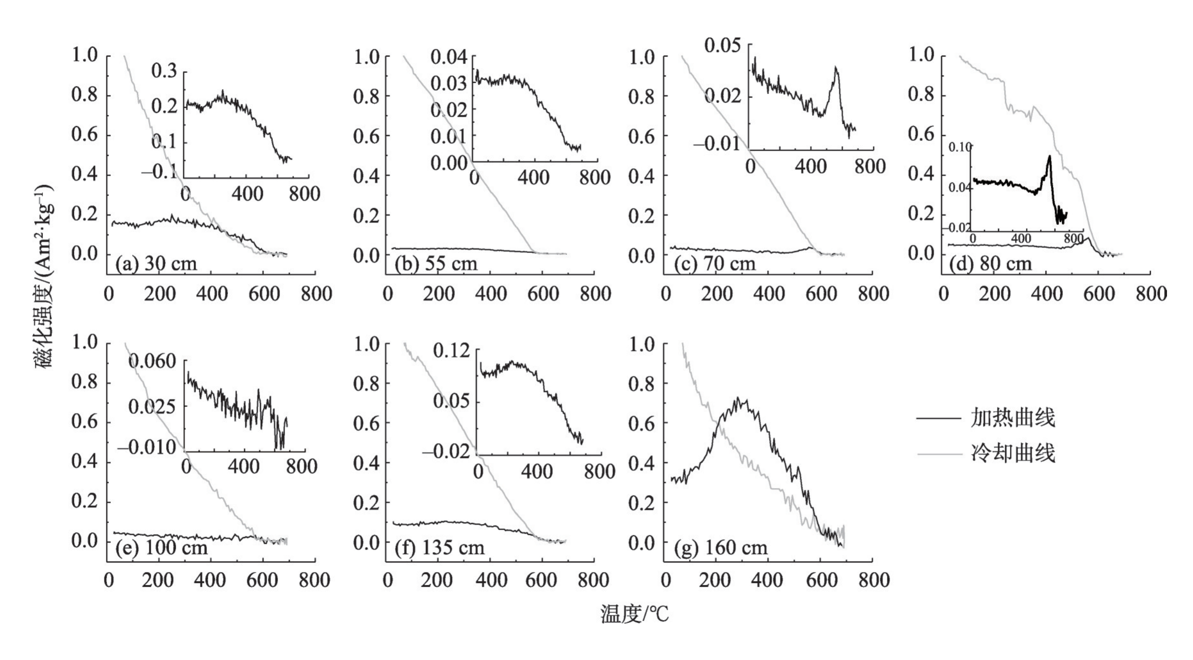


图6　LOP1剖面典型样品热磁曲线

Fig. 6　Representative temperature-dependent magnetization curve of LOP1 profile

于剖面最低值且无明显垂向波动。该层样品磁滞回线接近于一条直线,符合顺磁性矿物(如黄铁矿)的磁滞特征(图7,100 cm)。加热曲线上,随着温度增加,磁化强度呈现持续的波动性轻微下降,在500 ℃附近达到最低值,指示了顺磁性矿物(如黄铁矿)的存在[6]。(图6,100 cm)。XRD分析结果也表明,该层磁性矿物主要为黄铁矿(图8)。

层④,χ、SIRM、χ_{ARM}、χ_{ARM}/χ、SIRM/χ略高于层③,但明显低于层①和层②。该层具有剖面最低的$S_{-300\ mT}$值,显示高矫顽力磁性矿物(如赤铁矿等)的比例较高。热磁分析显示,该层的磁性矿物主要为磁铁矿,同时含有赤铁矿的贡献[6]。

层⑤,该层磁性特征(包括磁性参数、热磁特征和磁滞特征)与层③相似。

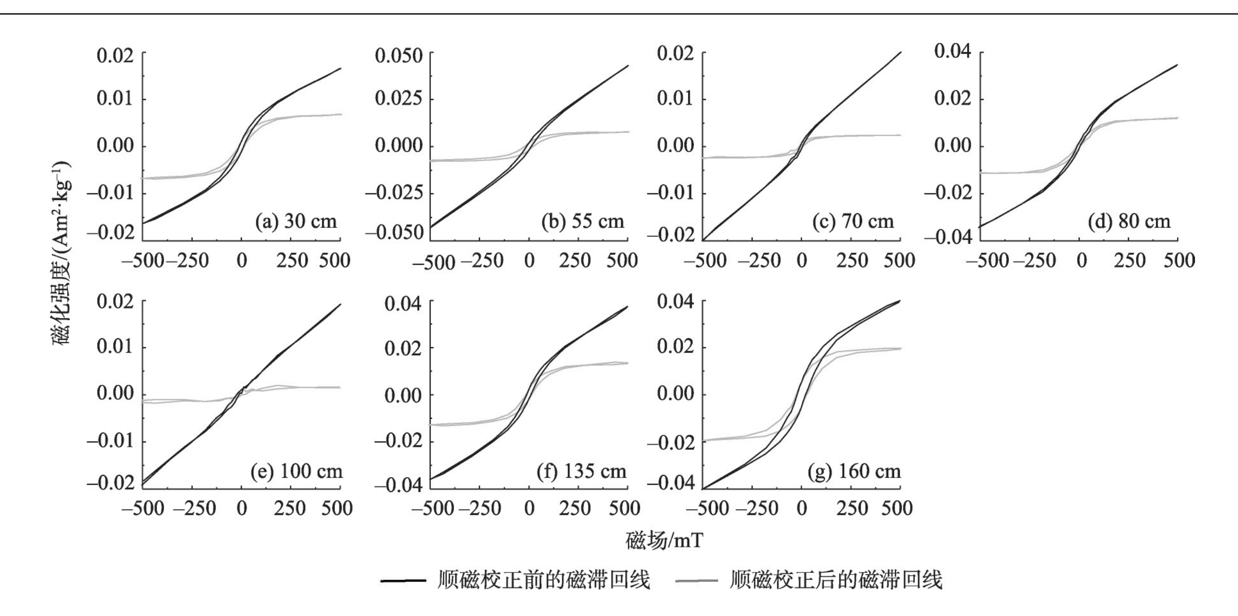
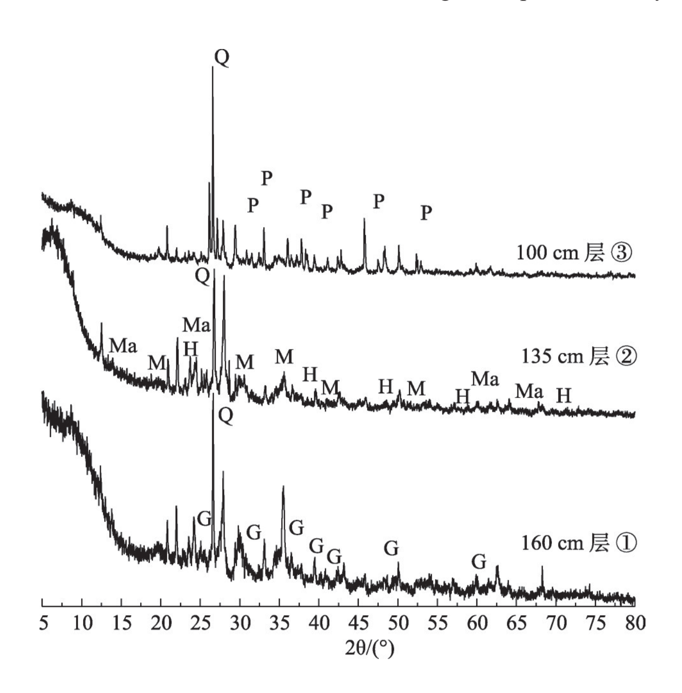


图7　LOP1剖面典型样品磁滞回线

Fig. 7　Representative hysteresis loop of LOP1 profile



注：G为胶黄铁矿；P为黄铁矿；M为磁铁矿；H为赤铁矿；Ma为磁赤铁矿；Q为石英。

图8　LOP1剖面典型样品的XRD分析结果

Fig. 8　Results of XRD analysis of extracted magnetic grains from LOP1 profile

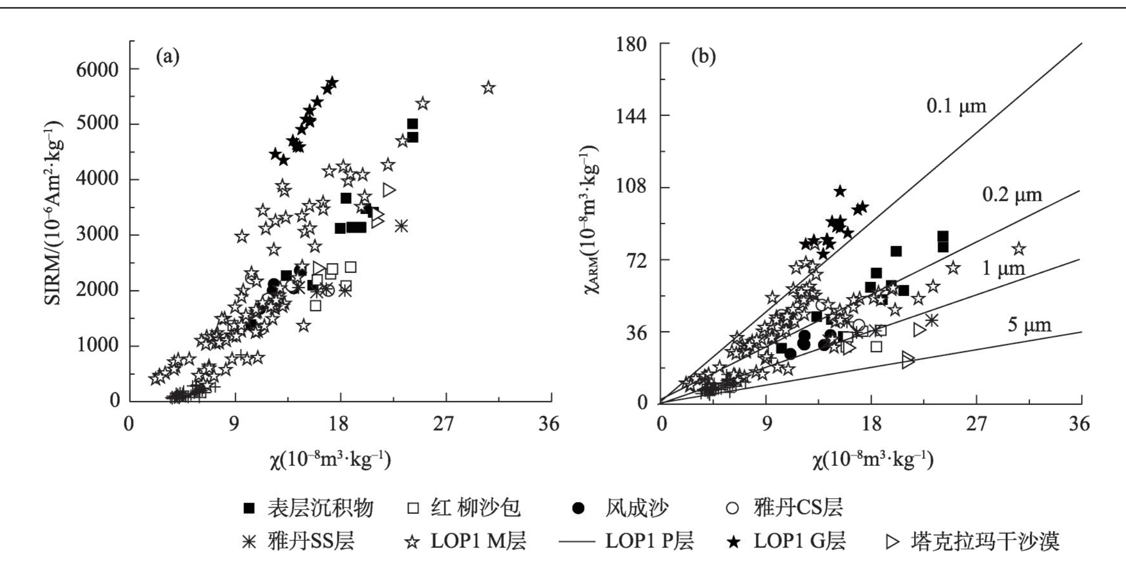
层⑥，自该层底部(62 cm)向上，$S_{-300\ mT}$呈现平稳上升的趋势，χ_{ARM}/χ与之相反，指示亚铁磁性矿物比例升高，颗粒变粗。χ、SIRM、χ_{ARM}变化趋势类似，自62 cm向上至表层，呈现先下降后增加的趋势。该层样品在热磁曲线上显示了磁铁矿的居里温度(580 ℃)(图6，30，55 cm)。

LOP1剖面有机质含量(计算自烧失量)变化范围为3.43%~19.81%，平均值为10.51%。总体上除40~28 cm层位较高外(17.14%~19.81%)，剖面有机质含量差异不大，含量变化多数落在5%~15%范围内，但层②、层④和层⑥(40~28 cm除外)相对较低(图5g)。

3　讨论

3.1　罗布泊沉积物磁性特征与沉积环境变化

物源、粒度和早期成岩作用是自然环境中沉积物磁性特征的主要控制因素[6]。LOP1剖面沉积物磁性特征分别为磁铁矿(层②，④，⑥)和铁硫化物(胶黄铁矿主导的层①和黄铁矿主导的层③，⑤)为主。如图9所示，层②，④，⑥沉积物磁性特征与罗布泊表层、风成沙、红柳沙包、雅丹以及塔里木盆地沉积物[17]的磁性矿物含量和颗粒特征较为一致，此外，这些层位以磁铁矿为主，伴生赤铁矿的矿物类型组合特征也与塔里木盆地沉积物一致[18]，显示该类沉积物中的磁性矿物主要来自于物源区塔里木盆地，且未受次生作用改造。前人研究认为，塔里木河、孔雀河、车尔臣河等河流长距离穿越的塔里木盆地沙漠地段对罗布泊沉积物的物源具有主导作用，这些河流在全新世时段不存在能够影响物源性质的水系变动[2]。此外，罗布泊全新世以来沉积物中的碎屑矿物类型及相对含量一致，也显示其物源较为稳定[19]。因此，物源不是引起LOP1剖面磁性特征变化的主要因素。



注：LOP1 M, P, G层分别为磁铁矿，黄铁矿，胶黄铁矿主导层。

图9　LOP1剖面不同层位与罗布泊盐湖表层物、红柳沙包、风成沙、雅丹以及塔克拉玛干沙漠沉积物磁性特征的对比

Fig. 9　Scatter plot of (a) χ versus SIRM and (b) χ versus χ_{ARM} t for samples from the different interval of the LOP1 profile, aeolian sands and yardang samples from Lop Nur, and aeolian sands from Taklimakan Desert

层①和层③、层⑤沉积物中的主导性磁性矿物分别为胶黄铁矿和黄铁矿，属于典型的硫酸盐还原成岩成因矿物。沉积物有机质降解驱动的早期成岩过程中，O_2、硝酸盐、锰氧化物、铁氧化物、硫酸盐等充当电子受体，在沉积物垂向剖面上形成不同的氧化还原带（氧化带、次氧化带、硫酸盐还原带和产甲烷带）[16]。在硫酸盐还原带，硫酸盐还原生成的H_2S，可与铁氧化物还原过程中生成的Fe^{2+}反应，形成一系列铁硫化物，在H_2S供应充足的情况下，最终生成还原条件下稳定的黄铁矿（FeS_2）。但当H_2S相对活性氧化铁供应不足时，会形成包括胶黄铁矿在内的中间过渡产物[15-16]。自生胶黄铁矿属于亚铁磁性矿物，一般表现为单畴（SD）状态，具有较高的χ、SIRM、$S_{-300\,mT}$、χ_{ARM}、χ_{ARM}/χ和SIRM/χ。而黄铁矿属于顺磁性矿物，对外加磁场非常不敏感，具有很低的χ、SIRM、$S_{-300\,mT}$[6]。

早期成岩成因胶黄铁矿的生成保存取决于活性铁、硫酸盐和有机质的平衡关系[16]。一般来说，以陆源碎屑为主要物质来源的湖泊沉积物中活性铁供应充足[16]。罗布泊沉积物盐类矿物含量达到20%~50%[2]，为早期成岩作用提供了丰富的硫酸盐供应。塔里木盆地气候干旱，植被覆盖率极低，导致罗布泊沉积物中有机质含量较低（TOC含量一般不超过0.5%）[20]，有机质供应可能是罗布泊沉积物还原成岩作用的限制因素。但在某些历史阶段由于气候变湿，塔里木盆地湿度上升，罗布泊沉积物有机质含量升高[2]。层①、层③和层⑤沉积物中有机质含量较高，有机质的降解促使硫酸盐还原成岩作用发生，并生成了自生胶黄铁矿和黄铁矿，即有机质供应增加是罗布泊沉积物中早期成岩成因自生铁硫化物生成的触发因素。

黄铁矿是硫酸盐还原作用的最终产物。层①相比层③、⑤，有机质含量差异并不明显，但该层自生铁硫化物为胶黄铁矿，显示黄铁矿化过程被抑制，这可能与沉积环境的变化有关。粒度分析显示层①的上覆沉积物在短期内快速变粗（图3）。短期内大量粗颗粒沉积物入湖会导致沉积速率升高，在沉积速率较高的情况下，沉积物中活性铁与H_2S反应不充分，形成的胶黄铁矿被快速埋藏，不能进一步反应生成黄铁矿[16]。在中国黄河三角洲[21]和美国Santa Barbara盆地[22]也发现高沉积速率抑制黄铁矿化过程的现象。40~28 cm段也具有较高的有机质含量，但主要磁性矿物为磁铁矿，未发生硫酸盐还原成岩作用，也可能与上层粒度快速变粗（图3），沉积物被快速埋藏有关。

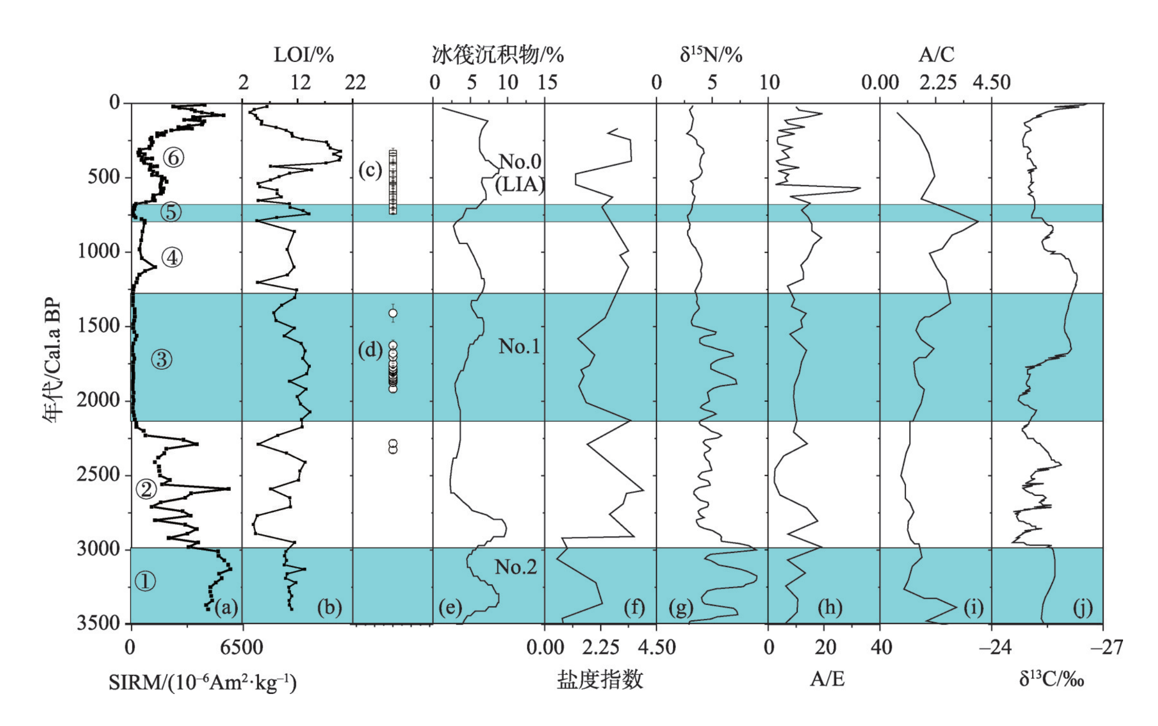
3.2　罗布泊盐湖磁性特征指示的区域气候变化

干旱区湖泊有机质含量增加通常反映流域植被和湿度状况改善[20]，野外观察发现罗布泊铁硫化物生成层位发育了反映深水低动能环境的韵律清晰的水平层理，也说明这些层位发育于湖水较深的

高湖面湿润阶段。结合年代学分析发现LOP1剖面的铁硫化物层位(层①,③,⑤)分别位于3400~3000 Cal. a BP,2200~1300 Cal. a BP和780~630 Cal. a BP期间,前二者大体对应于北大西洋冷事件2和1,后者位于中世纪暖期(NWP)向小冰期(LIA)的过渡阶段[23](图10a, 图10b, 图10d),显示在这些时段内罗布泊地区湿度较高。

Xu等[24]发现,楼兰文化的持续时间约为1950~1450 Cal. a BP((图10d),与LOP1剖面层③一致,显示当时罗布泊地区水量充盈,滋养了楼兰文化。李康康等[25]发现,700~500 Cal. a BP期间楼兰地区大量生长芦苇、胡杨、红柳(图10c),显示在中世纪暖期向小冰期过渡期间,楼兰地区水量丰沛,与层⑤一致。大范围内的对比分析发现,LOP1剖面铁硫化物发育期间,罗布泊上游的博斯腾湖盐度较低(图10f),指示淡水输入和流域湿度增加[26]。Lauterbach等[27]发现,吉尔吉斯斯坦境内的天山地区在3450~2850 Cal. a BP和1900~1500 Cal. a BP期间降水和冰川融水量明显增加(图10g),与LOP1剖面层①和③一致。乌伦古湖A/E值[28]和赛里木湖沉积物[29]A/C值在3400~3000 Cal. a BP和700 Cal. a BP左右较高(图10h~图10i),显示流域湿度增加,与LOP1剖面层①和⑤一致。柴窝铺泥炭沉积物$\delta^{13}C$在3400~3000 Cal. a BP及1800~1200 Cal.a BP期间偏负(图10j),指示期间区域暖季降水增加[30],与LOP1剖面层①和③一致。

综上所述,笔者发现中晚全新世以来冷事件期间罗布泊及其周边地区气候趋向湿润,这是因为冷事件期间,西风急流强度增加,位置南移,为中亚地区带来更多的降水,高海拔山地地区冰川前进[31],增加的降水和冰川积雪融水以及降低的气温和蒸发,使塔里木河流域湿度和植被改善,为罗布泊增加了有机质供应,促进早期成岩成因次生铁硫化物生成。由于LOP1剖面的年代框架是通过与前人研究结果对比获得,可能存在不确定性。但在考虑年代误差的情况下LOP1剖面的重建序列与周边地区研究结果可以相互印证。因此,罗布泊地区气候环境变化与高纬度地区气候突变事件具有关联性的论断是可信的。测年工作是罗布泊地区古环境研究的最大难点之一[32],未来工作中会加强罗布泊地区的年代学测试。



注:(c)为楼兰地区植物遗迹年龄分布;(d)为楼兰古城年龄;(e)为北大西洋全新世冷事件记录;(f)为博斯腾湖盐度记录;(g)为Son kol湖沉积物的$\delta^{15}N$记录;(h)为乌伦古湖A/E记录;(i)为赛里木湖A/C记录;(j)为柴窝铺泥炭$\delta^{13}C$记录。

图10 LOP1剖面气候变化记录(a, b)与其他记录对比

Fig. 10 Comparisons between the magnetic properties(a) and LOI(b) record of LOP1 profile and other climate records in the surrounding area

4 结 论

罗布泊中晚全新世以来的沉积物中发育了早期成岩成因的自生胶黄铁矿和黄铁矿，并对磁性特征产生显著影响，胶黄铁矿导致沉积物明显较高的χ、SIRM、χ_{ARM}、χ_{ARM}/χ和$S_{-300\ mT}$，黄铁矿相反。罗布泊极端干旱环境中，有机质供应是盐湖早期成岩作用的主控因素。全新世冷事件期间塔里木盆地湿度条件改善以及有机质供应增加触发了罗布泊盐湖的早期成岩作用。罗布泊盐湖沉积物磁性特征可以用来作为区域气候环境变化的指示指标。

参考文献(References)

[1] Zheng M P, Zhang Y S, Liu X F, et al. Progress and prospects of salt lake research in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(4), 1195–1235.

[2] 夏训诚, 王富葆, 赵元杰. 中国罗布泊[M]. 北京: 科学出版社, 2007. [Xia Xuncheng, Wang Fubao, Zhao Yuanjie. China Lop Nur [M]. Beijing: Science Press, 2007.]

[3] 李典鹏, 孙涛, 姚美思, 等. 盐湖区生态系统碳密度及其分配格局[J]. 干旱区研究, 2018, 35(4): 984–991. [Li Dianpeng, Sun Tao, Yao Meisi, et al. Carbon density and its distribution pattern of ecosystem in saline region[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(4): 984–991.]

[4] 赵明, 季峻峰, 陈小明, 等. 古盐度对塔北隆起泥岩中粘土矿物组合和绿泥石成分的影响[J]. 高校地质学报, 2015, 21(3): 365–375. [Zhao Ming, Ji Junfeng, Chen Xiaoming, et al. Effects of paleosalinity on clay mineral assemblages and chlorite composition in mudstone of Tabei uplift, Xinjiang, China[J]. Geological Journal of China Universities, 2015, 21(3): 365–375.]

[5] 程国帅, 刘东伟, 温璐, 等. 干涸盐湖地下水和土壤化学属性对自然植被分布的控制作用[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 85–94. [Cheng Guoshuai, Liu Dongwei, Wen Lu, et al. Effects of groundwater and soil chemical properties on distribution of natural vegetation around playa[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(1): 85–94.]

[6] Thompson R, Oldfield F. Environmental Magnetism[M]. London: Alleen and Unwin, 1986.

[7] 全婷婷, 陈学刚, 魏疆. 新疆天山天池景区土壤磁学特征及其环境意义[J]. 干旱区研究, 2017, 34(6): 1286–1293. [Quan Tingting, Chen Xuegang, Wei Jiang. Magnetic properties of topsoil and ilts environmental implications in the Tianshan Heaven Lake scenic spot, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(6): 1286–1293.]

[8] Li W, Mu G, Zhang W, et al. Formation of greigite (Fe_3S_4) in the sediments of saline lake Lop Nur, northwest China, and its implications for paleo-environmental change during the last 8400 years [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 174: 99–108.

[9] 董李, 李艳红. 罗布泊风积物与冲洪积物磁性变化特征的对比研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(11): 111–116. [Dong Li, Li Yanhong. Comparative study on magnetic variations of eolian and alluvial-proluvial sediments from Lop Nur area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(11): 111–116.]

[10] 常秋芳, 常宏. 罗布泊Ls2孔近7. 1 Ma以来沉积物的环境磁学研究[J]. 第四纪研究, 2013, 33(5): 876–888. [Chang Qiufang, Chang Hong. The environmental magnetism study of core Ls2 in Lop Nur, Tarim since 7. 1 Ma[J]. Quaternary Sciences, 2013, 33 (5): 876–888.]

[11] 高洁, 李从娟, 徐新文, 等. 罗布泊地区引种植物生理生化指标的主成分及其聚类分析[J]. 干旱区研究, 2018, 35(1): 199–206. [Gao Jie, Li Congjuan, Xu Xinwen, et al. Principal components and cluster analysis on the physiological and biochemical indexes of introduced plants in Lop Nur[J]. Arid Zone Research, 2018, 35 (1): 199–206.]

[12] Dong Z, Lyu P, Qian G, et al. Research progress in China's Lop Nur[J]. Earth-Science Reviews, 2012, 111(1): 142–153.

[13] King J, Banerjee S K, Marvin J, et al. A comparison of different magnetic methods for determining the relative grain size of magnetite in natural materials: Some results from lake sediments[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1982, 59(2): 404–419.

[14] Ma C, Wang F, Cao Q, et al. Climate and environment reconstruction during the Medieval Warm Period in Lop Nur of Xinjiang, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53: 3016–3027.

[15] Roberts A P. Magnetic properties of sedimentary greigite (Fe_3S_4) [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1995, 134(3): 227–236.

[16] Roberts A P. Magnetic mineral diagenesis[J]. Earth-Science Reviews, 2015, 151: 1–47.

[17] Li C, Yang S, Zhang W. Magnetic properties of sediments from major rivers, aeolian dust, loess soil and desert in China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 45: 190–200.

[18] Zan J, Fang X, Appel E, et al. New insights into the magnetic variations of aeolian sands in the Tarim Basin and its paleoclimatic implications[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2014, 229: 82–87.

[19] 李文. 罗布泊盐湖沉积物磁性特征及其古环境记录研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017. [Li Wen. Magnetic Properties of Sediments of Saline Lake Lop Nur and Its Implications for Paleo-environmental Change [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.]

[20] 林永崇. 罗布泊湖泊沉积物记录的全新世以来区域环境变化[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017. [Lin Yongchong. Holocene Environmental Change Recorded by Lacustrine Sediments in Lop Nur, Xinjiang[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.]

[21] Wang Y, Zhang W, Liu X, et al. Formation of greigite under different climate conditions in the Yellow River delta[J]. Science China Earth Sciences, 2014, 58(2): 300–308.

[22] Blanchet C L, Thouveny N, Vidal L. Formation and preservation of greigite (Fe_3S_4) in sediments from the Santa Barbara Basin: Implications for paleoenvironmental changes during the past 35 ka[J].

Paleoceanography, 2009, 24(2): PA224.

[23] 王绍武. 全新世北大西洋冷事件: 年代学和气候影响[J]. 第四纪研究, 2009, 29(6): 1146-1153. [Wang Shaowu. Holocene cold events in the north Atlantic: Chronology and climatic impact[J]. Quaternary Sciences, 2009, 29(6): 1146-1153.]

[24] Xu B, Gu Z, Qin X, et al. Radiocarbon dating the ancient city of Loulan[J]. Radiocarbon, 2017: 1-12.

[25] 李康康, 秦小光, 张磊, 等. 罗布泊(楼兰)地区 1260~1450 A. D. 期间的绿洲环境和人类活动[J]. 第四纪研究, 2018, 38(3) : 720-731. [Li Kangkang, Qin Xiaoguang, Zhang Lei, et al. The ancient oasis and human activity in Lop Nur (Loulan) region during1260-1450 A. D. [J]. Quaternary Sciences, 2018, 38(3) : 720-731.]

[26] Ran M, Zhang C, Feng Z. Climatic and hydrological variations during the past 8000 years in northern Xinjiang of China and the associated mechanisms[J]. Quaternary International, 2015, 358: 21-34.

[27] Lauterbach S, Witt R, Plessen B, et al. Climatic imprint of the mid-latitude Westerlies in the Central Tian Shan of Kyrgyzstan and teleconnections to North Atlantic climate variability during the last 6000 years[J]. Holocene, 2014, 24(8): 970-984.

[28] Liu X Q, Herzschuh U, Shen J, et al. Holocene environmental and climatic changes inferred from Wulungu Lake in northern Xinjiang, China[J]. Quaternary Research, 2008, 70: 412-425.

[29] Jiang Q F, Ji J F, Shen J, et al. Holocene vegetational and climatic variation in westerly-dominated areasof Central Asia inferred from the Sayram Lake in northern Xinjiang, China[J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 56: 339-353.

[30] Hong B, Gasse F, Uchida M, et al. Increasing summer rainfall in arid eastern-Central Asia over the past 8500 years[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 5279.

[31] Chen F, Jia J, Chen J, et al. A persistent Holocene wetting trend in arid central Asia, with wettest conditions in the late Holocene, revealed by multi-proxy analyses of loess-paleosol sequences in Xinjiang, China[J]. Quaternary Science Reviews, 2016, 146: 134-146.

[32] Zhang J F, Liu, C L, Wu X H, et al. Optically stimulated luminescence and radiocarbon dating of sediments from Lop Nur (Lop Nor), China[J]. Quaternary Geochronology, 2012, 10: 150-155.

Magnetic properties of Lop Nur saline sediments and the environmental implications

LI Wen[1,2], MU Guijin[2], LIN Yongchong[3], ZHANG Huijuan[1], WU Wangyang[1]

(1. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China;
2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China;
3. School of history and Geography, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, Fujian, China)

Abstract: This article presents the particle size, total organic matter, rock magnetic, and x-ray diffraction analyses of saline lake sediments, aeolian sands, Tramarix cone, and yardangs sediments distributed along the west bank of Lop Nur. The aim was to investigate the vertical variations and influencing factors of magnetic characteristics, as well as the paleoenvironmental implications. Based on the magnetic properties, Lop Nur sediments can be divided into two types. In oxidizing environments, sediment magnetic properties are dominated by magnetite, which is consistent with the source materials (Tarim Basin) and are unaffected by early diagenesis. In reducing environments, sediment magnetic properties are dominated by authigenic iron sulfide (greigite and pyrite), which formed in the early diagenesis process. Layers that are dominated by greigite or pyrite have markedly higher or lower χ, SIRM, χ_{ARM}, and χ_{ARM}/χ and $S_{-300\ mT}$, respectively, reflect the significant impact of early diagenesis on magnetic properties in the Lop Nur. Combined with the results of chronology from a previous study, we determined that the iron sulfide-bearing sediments were deposited during cold and wet periods, which were probably caused by the North Atlantic cold events that occurred throughout the past 3400 yr. During these periods, iron sulfide formation was likely driven by an enhanced organic matter supply. The magnetic parameters of Lop Nur sediments can be regarded as an indicator of the hydrological and climatic evolution of the Tarim Basin.

Keywords: magnetic properties; early diagenesis; saline lake; climate change; Lop Nur